

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.127



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 注浆流量对微生物矿化封堵裂隙降渗及沉淀分布特征的影响

刘乾灵<sup>1</sup>, 张彬<sup>2</sup>, 周自强<sup>1</sup>, 陈豫津<sup>1</sup>, 石磊<sup>3</sup>, 汪霞<sup>4</sup>

(1. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 兰州 730000; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 3. 河南大学建筑工程学院, 河南 开封 475004; 4. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

**摘要:** 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术在岩体微裂隙注浆封堵中展现出良好的应用潜力。然而, 目前该技术仍面临沉淀分布不均的问题, 局部沉淀堵塞不仅影响注浆过程的连续性, 还会降低封堵效果的可靠性, 甚至引发工程安全事故。基于自主设计的裂隙模型试验装置, 研究注浆流量对微生物矿化封堵裂隙降渗及沉淀分布特征的影响。首先分析注浆流量对裂隙中菌液附着率的影响, 然后对其进行注浆矿化封堵, 测试其对裂隙封堵降渗效率的影响, 最后通过三维扫描获取裂隙中的沉淀分布特征。结果表明: 随着注浆流量增加, 菌液滞留效率明显下降; 注浆流量的变化会显著影响沉淀在裂隙中的分布特征, 而沉淀空间分布差异会进一步导致裂隙渗透性下降过程呈现不同规律; 当裂隙内浆液流速为 4.708 mm/s 时, 可实现较高的浆液利用率和理想的封堵效果。

**关键词:** 微生物诱导碳酸钙沉淀; 封堵裂隙; 浆液流速; 沉淀分布

中图分类号: TU472.9 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2026)03-0089-10

## Effects of grouting flow rate on seepage reduction and precipitation distribution characteristics in microbially mediated fracture mineralization sealing

LIU Qianling<sup>1</sup>, ZHANG Bin<sup>2</sup>, ZHOU Ziqiang<sup>1</sup>, CHEN Yujin<sup>1</sup>, SHI Lei<sup>3</sup>, WANG Xia<sup>4</sup>

(1. Institute of Geological Natural Disaster Prevention and Control, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P. R. China; 2. School of Engineering & Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, P. R. China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, P. R. China; 4. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China)

**Abstract:** Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) technique shows significant potential for grouting and sealing micro-fractures in rock. However, its application is currently challenged by uneven precipi-

收稿日期: 2025-09-15

基金项目: 甘肃省科技重大专项(22ZD6FA042); 甘肃省科学院引进人才科研启动经费(2025QD-25); 国有资本经营预算支持省属企业科研项目(2024GZ033)

作者简介: 刘乾灵(1996-), 男, 博士, 主要从事微生物岩土工程研究, E-mail: 1522246297@qq.com。

张彬(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: sc\_zhb@cugb.edu.cn。

Received: 2025-09-15

**Foundation items:** Gansu Province Science and Technology Major Project (No. 22ZD6FA042); Talent Introduction and Cultivation Program of Gansu Academy of Sciences (No. 2025QD-25); State Capital Operating Budget Supports Scientific Research Projects of Provincial-Level State-Owned Enterprises (No. 2024GZ033)

**Author brief:** LIU Qianling (1996-), PhD, main research interest: biogeotechnical engineering, E-mail: 1522246297@qq.com.

ZHANG Bin (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: sc\_zhb@cugb.edu.cn.

tate distribution, where localized clogging can disrupt grouting continuity, compromise sealing reliability, and even introduce engineering safety risks. This study investigated the effects of grouting flow rate on permeability reduction and precipitate distribution characteristics during MICP-based fracture sealing using a self-designed fracture model apparatus. The experimental sequence followed analyzing the influence of flow rate on bacterial attachment efficiency, implementing mineralization grouting for fracture sealing, monitoring the permeability reduction process, and characterizing precipitate distribution through 3D scanning. The results indicate that an increase in grouting flow rate leads to a significant reduction in bacterial retention efficiency. Variations in grouting flow rate markedly affect the distribution patterns of precipitates in the fractures, and differences in the spatial distribution of precipitates further cause variations in the permeability reduction process. A flow velocity of 4.708 mm/s was identified as optimal, achieving both high grout utilization efficiency and effective sealing performance.

**Keywords:** microbially induced calcite precipitation (MICP); rock fracture sealing; grouting flow rate; precipitation distribution

在地下工程(如大型水电站厂房<sup>[1]</sup>、地质处置库<sup>[2]</sup>、隧道<sup>[3]</sup>等)建设中,围岩体内广泛发育的裂隙网络引发的渗流问题是当前工程渗控领域面临的一大难题<sup>[4]</sup>。传统的注浆材料(如水泥浆液)粒径大、黏度高,对于围岩较为破碎区域,能实现有效注浆渗控,而对于裂隙开度较小的微裂隙区域,则存在可灌性差、注浆后反复渗漏等问题<sup>[5]</sup>。此外,部分化学浆液还具有一定毒性,存在污染周边水土环境的风险<sup>[6]</sup>。

微生物岩土技术是 21 世纪初提出的一项新型岩土工程技术<sup>[7-9]</sup>。对于岩体裂隙注浆封堵来说,微生物矿化反应生成的沉淀物具有黏度低、颗粒尺寸小、环境友好、反应易控制等优点,被认为是岩体微裂隙注浆渗控中最有可能替代水泥和化学浆液的注浆材料<sup>[10]</sup>。然而,在不合理的注浆策略下, MICP 反应生成的沉淀易堆积在注入口,造成沉淀不均匀分布<sup>[11]</sup>,形成局部堵塞效应<sup>[12]</sup>。Tobler 等<sup>[13]</sup>通过对注浆后裂隙面进行 CT 扫描发现,裂隙中沉淀生成量少的试验组比生成量多的试验组渗透性降低更多。其原因为裂隙中沉淀生成的量以及分布特征共同决定渗透性的降低程度,而裂隙渗透率降低主要受  $\text{CaCO}_3$  填充率最高的部分控制<sup>[14]</sup>。因此,当沉淀在裂隙中局部堵塞形成桥接时,将导致渗透性快速下降<sup>[15-16]</sup>。沉淀在局部堵塞不仅不能对裂隙形成有效的连续防渗屏障<sup>[17]</sup>,在特殊环境下,当桥接部分遭受冲刷或在外力等作用下发生剪切破坏后, MICP 注浆封堵效果将失效<sup>[14]</sup>。因此,如何防止注浆局部堵塞并保证裂隙中生成的沉淀能均匀分布是 MICP 技术封堵岩体裂隙的关键<sup>[12]</sup>。

学者们主要从浆液浓度及活性、注浆方式、注入速率等方面研究裂隙中沉淀分布的控制机制。菌液在岩土体中的分布与附着行为对实现沉淀均

匀分布至关重要。由于沉淀生成量主要依赖裂隙中附着的微生物数量<sup>[18]</sup>,因此,均匀的细菌分布可促进碳酸钙的均匀沉积<sup>[19]</sup>。此外,Chen 等<sup>[20]</sup>和 Wu 等<sup>[14]</sup>研究发现,可通过调控微生物浆液浓度来改变矿化絮状物尺寸,从而实现沉淀过程的精准控制,达到对裂隙的均匀封堵。然而数值分析<sup>[21]</sup>以及模型试验<sup>[22]</sup>研究发现,微生物附着受浆液流动速度的影响最显著。在注浆策略方面,注入菌液后再加入固定剂(如 50 mmol/L 的  $\text{CaCl}_2$ )的方式可减少封堵所需注浆次数<sup>[12]</sup>,并促进沉淀均匀分布<sup>[13]</sup>。然而,肖维民等<sup>[12]</sup>通过对比试验发现,与加入固定剂相比,注入速率对沉淀分布的影响更显著,表现为高注入速率下裂隙表面碳酸钙分布更均匀。

尽管微生物浆液浓度与注入方式等因素对沉淀分布具有一定影响,但众多研究表明,浆液流速对沉淀分布起决定性作用,这已成为该领域的广泛共识<sup>[22-25]</sup>。因此,众多学者围绕 MICP 裂隙封堵过程中浆液流速对沉淀分布的影响展开了深入研究。El Mountassir 等<sup>[26]</sup>和 Minto 等<sup>[10]</sup>通过模型试验对微生物矿化封堵裂隙过程进行了可视化研究,结果表明,调节浆液流速可有效控制沉淀在裂隙中的分布位置以及封堵效果。此外,还有学者提出采用恒定注入压力方式,以期实现对裂隙的更均匀封堵。Zambare 等<sup>[22]</sup>认为,影响沉淀分布的因素可归结为矿化反应速率与沉淀运输速率两大类,同时提出了采用 Damköhler (Da 数)量化矿化反应速率与沉淀运输速率对沉淀分布的影响,并认为浆液流动形成的流动剪切应力是影响沉淀分布的主要因素。在注浆完成后, Wu 等<sup>[14,27]</sup>采用三维激光扫描技术对裂隙中沉淀分布进行可视化表达发现,较高的注入速率有助于将沉淀运输至裂隙中更远的位置,从而避免在注入口堵塞。然而,过高的流速会因流体剪切

力的增强而降低沉淀效率。进一步分析发现,浆液流速对沉淀封堵效率的影响符合指数型下降规律。Shi等<sup>[25]</sup>通过正交试验研究多种因素对裂隙封堵效果的影响发现,注浆流量对裂隙渗透性及沉淀分布的影响最显著。研究进一步表明,注浆流量通过控制沉淀在裂隙中的分布特征,显著改变了裂隙的渗流路径与行为,进而对封堵过程中裂隙渗透性降低进行了解释。

已有研究表明,流速对微生物在矿化封堵过程中的沉淀分布影响显著且机制复杂。尽管现有研究普遍定性地指出了浆液流速对沉淀分布的影响,然而关于流速如何具体调控裂隙内沉淀物的空间分布特征及其与裂隙渗透性下降之间的互相关系,仍缺乏系统性研究。基于此,笔者利用自行设计的裂隙模型试验装置,以注入流量为变量,系统研究不同流速条件下菌液在裂隙中的滞留效应、封堵过程中裂隙渗透性的演化规律以及注浆完成后裂隙中沉淀的分布特征。从多角度揭示浆液流速对微生物封堵过程的影响机制,进而获得在径向流条件下实现沉淀均匀分布的合理浆液流速。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 微生物浆液

试验所用细菌为巴氏芽孢杆菌(ATCC11859),其广泛存在于土壤和地下水环境中,具有高脲酶活性<sup>[7]</sup>。扩大培养的液体培养基成分为20 g/L尿素、15 g/L酪蛋白胨、5 g/L大豆蛋白胨、5 g/L氯化钠,培养基溶液pH值调至7.3。按照1:100比例接种后,在温度30℃、振荡速度120 r/min的环境下培养24 h,培养完成后放置冰箱,在4℃环境中保存,以供后续使用。试验所用菌液浓度OD<sub>600</sub>和脲酶活性分别为(1.8±0.05)、(15.8±0.05)(mmol/L)/min,其中菌液浓度使用光密度计(上海舜宇恒平752)进行测量,基于Whiffin等<sup>[28]</sup>提出的尿素水解法测试脲酶活性。

胶结液由等摩尔乳酸钙和尿素制备而成,浓度为0.75 mol/L。

#### 1.1.2 裂隙模型装置

如图1所示,裂隙模型试验装置由微生物浆液输入/输出系统、裂隙渗流系统和数据采集系统组成,其中,图1(a)为裂隙模型效果图,图1(b)、(c)分别为裂隙模型盒的俯视图和侧视图。裂隙模型由粗糙花岗岩底板(300 mm×100 mm×30 mm)和透明亚克力顶板组成,花岗岩底板放置于中间凿空的模型箱中,花岗岩板与模型箱之间的空隙通过添加密

密封胶来防止微生物浆液渗入到模型箱中。采用三维激光扫描获得花岗岩底板表面厚度分布数据(图1(a)),基于周宏伟等<sup>[29]</sup>提出的粗糙表面分维立方体覆盖法计算得到裂隙表面平均分形维数 $D$ 为2.025。

在裂隙渗透性测试过程中,设定蠕动泵以5 mL/min流量持续向裂隙模型中注入去离子水,待注入压力达到稳定状态后,记录压力表读数,按照式(1)、式(2)计算裂隙导水系数 $T$ 。通过测试计算,裂隙初始导水系数 $T_0=5.092\times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s,裂隙初始等效水力隙宽 $b_h=0.177$  mm,初始裂隙体积为5.31 cm<sup>3</sup>。基于裂隙等效水力隙宽,按式(3)、式(4)计算裂隙中初始平均流速 $v$ 。

$$Q_{\text{planar}} = \frac{W}{L} \left( \frac{\rho g}{12\mu} \right) b_h^3 \Delta h \quad (1)$$

$$T = \left( \frac{\rho g}{12\mu} \right) b_h^3 \quad (2)$$

$$A = W \times b_h \quad (3)$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

式中: $Q$ 为注入流量,m<sup>3</sup>/s; $W$ 为裂隙宽度,m; $L$ 为裂隙长度,m; $A$ 为裂隙横截面积,m<sup>2</sup>; $\rho$ 为流体密度,kg/m<sup>3</sup>; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>; $\mu$ 为流体运动黏度,kg/(m·s); $\Delta h$ 为裂隙两侧的水头差,m,由压力表数据换算得到; $v$ 为流体流速,m/s。

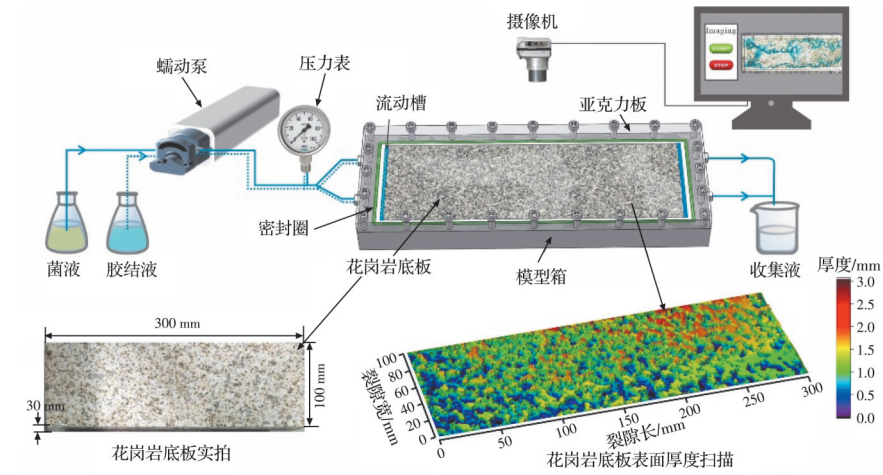
### 1.2 试验方案

#### 1.2.1 菌液穿透曲线测试

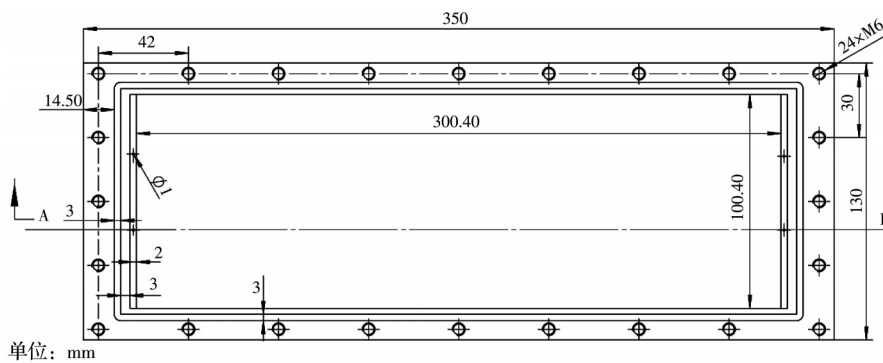
穿透曲线(breakthrough curves, BTCs)是分析菌液在岩土体中迁移与滞留行为的重要手段,常用于量化物理、化学及生物参数对其运移、分布和扩散的影响<sup>[22,30]</sup>。在测试中,每组穿透试验前首先向裂隙中注入不少于20 mL的生理盐水,以防止注入的微生物由于浓度差而出现渗透性休克<sup>[31]</sup>。随后设置蠕动泵注入体积为20 mL,注入流量分别为2.5、5、7.5、10 mL/min,将配制好的菌液通过蠕动泵注入裂隙,进行4组穿透试验。注菌过程中,自注入开始即在裂隙出口按每次2 mL连续采集流出液;菌液注入完毕后,立即以相同流量继续注入30 mL生理盐水,并持续收集流出液。注入完成后对收集液进行菌液浓度测试。每组穿透试验完成后,向裂隙中注入大量去离子水,冲洗残余菌液,直到流出液中菌液浓度为0。

#### 1.2.2 微生物矿化封堵裂隙渗透性测试

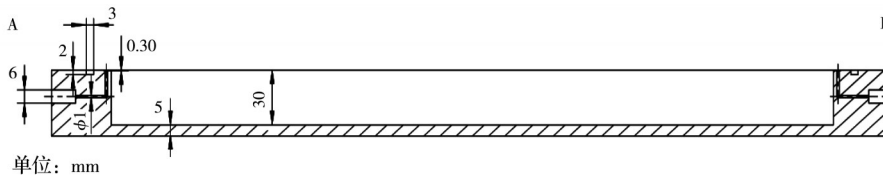
采用菌液与胶结液交替循环注入的方式开展封堵试验。设置每次循环中菌液、胶结液的注入体积均为20 mL,注入流量分别为2.5、5、7.5、10 mL/min,



(a) 裂隙模型试验装置示意图



(b) 裂隙模型俯视图



(c) 裂隙模型左视图

图 1 裂隙模型试验装置<sup>[16]</sup>

Fig. 1 The schematic diagram of the test setup<sup>[16]</sup>

进行 4 组裂隙封堵试验。每组试验进行 20 次连续注入循环,每次循环结束后按照式(1)、式(2)对裂隙进行渗透性测试。每组试验完成后都使用盐酸(1 mol)清洗裂隙中生成的沉淀(经试验前测试,盐酸不会对花岗岩板产生影响),待沉淀彻底清除干净后,再使用大量清水冲洗。在进行下组试验前,对裂隙进行初始渗透性测试,以确保 4 组试验裂隙初始条件相同。

1.2.3 三维激光扫描采集沉淀分布特征

在上述各组注入流量矿化封堵试验结束后,向裂隙中注入大量去离子水清洗未反应的微生物浆液。随后将裂隙模型打开,在室温中静置约 2 h,待试样晾干。由于重力作用<sup>[26]</sup>以及岩样表面相比于亚克力板更为粗糙<sup>[32]</sup>,试验中沉淀物基本都附着在下裂隙面。因此,只对花岗岩裂隙表面附着的沉淀进行扫描分析。

采用 HandySCAN BLACK™ |Elite 三维激光扫描仪进行数据采集(图 2),扫描精度为 0.01 mm,测量分辨率为 0.020 mm。在扫描之前,通过设定统一参照物,以确保 4 组不同注入流量试验以及裂隙



图 2 注浆完成后对裂隙面进行三维激光扫描

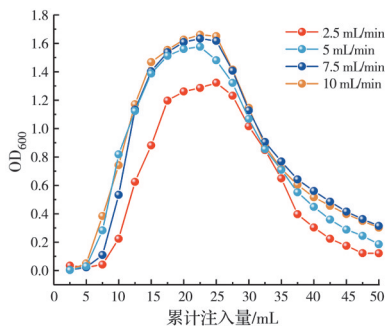
Fig. 2 3D laser scanning of fracture surface after grouting

模型初始状态下扫描得到的点云数据可以进行统一对齐处理。点云数据经封装处理后,利用克里金插值法<sup>[33]</sup>,按0.1 mm间隔进行等间距插值,最终获取不同试验条件下的沉淀分布厚度数据。

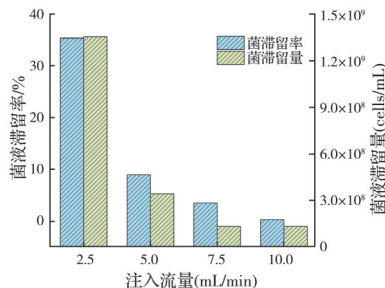
## 2 试验结果

### 2.1 注入流量对菌液在裂隙中滞留率的影响

图3(a)为不同注入流量条件下菌液浓度在裂隙中的穿透曲线。从图中可以看到,在各组试验注菌过程中,穿透曲线达到峰值后都出现了平稳段,表明注入的微生物在裂隙表面的附着趋于饱和<sup>[30]</sup>,可见,选择注入体积为20 mL是合理的。同时,在所有试验中,收集到的菌液峰值浓度均低于注入浓度( $OD_{600}=1.8$ ),说明菌液在运移过程中发生了明显的滞留现象。如图3(a)所示,在不同注入流量下,菌液在裂隙中的滞留呈现明显的规律性变化。当注入流量为2.5 mL/min时,收集液中菌液浓度峰值为1.322  $OD_{600}$ 。当注入流量增大到5、7.5、10 mL/min时,收集液中菌液浓度峰值 $OD_{600}$ 分别增大到1.576、1.633、1.660。可见,随着注入流量的增大,更多的菌被冲出了裂隙,菌液在裂隙中的滞留效果变差。



(a) 不同注入流量下菌液浓度穿透曲线



(b) 不同注入流量下菌液在裂隙中的滞留率

图3 注入流量对菌液在裂隙中滞留率的影响

Fig. 3 Effect of grouting flow rate on bacterial retention efficiency in fractures

在注入生理盐水阶段,所有曲线均呈下降趋势。值得注意的是,在较低注入流量下(2.5、5 mL/min),曲线下降更为迅速,推测为在较低流速下微生物在

裂隙表面的附着较为稳定,冲刷缓慢,裂隙中滞留了更多菌液。为进一步探究不同注入流量对菌液在裂隙中滞留行为的影响,定量计算菌液在裂隙中的滞留率以及滞留量。首先,依据巴氏芽孢杆菌浓度与细菌数量的换算关系(式(5))<sup>[34]</sup>,将不同注入流量下测得的菌液浓度穿透曲线转换为细菌数量随时间变化的曲线,然后通过积分计算获得未有效附着在裂隙中的菌液数量( $M_{co}$ , cells/mL)。将该值与注入裂隙的总细菌量( $M_{sum}$ , cells/mL)相减,即可得到附着在裂隙中的细菌量( $M_{re}$ , cells/mL)(式(5))。最后通过式(6)计算得到菌液在裂隙中的滞留率 $\eta$ ,结果如图3(b)所示。

$$Y = 8.59 \times 10^7 Z^{1.3627} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{M_{re}}{M_{sum}} \quad (6)$$

式中: $Z$ 为 $OD_{600}$ 的值; $Y$ 为细胞浓度,cells/mL。

如图3所示,随着注入流量从2.5 mL/min增大到10 mL/min,菌液在裂隙中的滞留率和滞留量都快速下降,滞留率由原来的35.5%降低到0.29%,细菌滞留量也从 $1.35 \times 10^9$  cells/mL下降到 $1.11 \times 10^7$  cells/mL,约降低了两个数量级。由此可见,浆液注入流量对菌液在裂隙中的滞留效率具有重要影响。较大的浆液注入流量减弱了微生物与裂隙表面的接触作用,碰撞次数减少(对流成为主要的传输过程)<sup>[30]</sup>,同时增大了流动剪切力,从而显著降低了菌液利用率。

### 2.2 注入流量对裂隙封堵效率的影响

在20次注浆循环过程中,不同微生物浆液注入流量对裂隙注浆压力及导水系数变化的影响如图4所示。整体来看,在2.5、5、7.5、10 mL/min注入流量下,20次循环后裂隙导水系数从初始的 $5.092 \times 10^{-6}$   $m^2/s$ 分别降低至 $2.17 \times 10^{-8}$ 、 $2.10 \times 10^{-8}$ 、 $2.72 \times 10^{-8}$ 、 $3.22 \times 10^{-8}$   $m^2/s$ ,不同流量条件下降低程度相似,其中5 mL/min工况下封堵效果更优。

然而,就注浆封堵过程来看,不同浆液注入流量对裂隙导水系数下降具有一定影响。具体而言,在初始注浆循环中,较低注入流量(2.5、5 mL/min)条件下裂隙导水系数下降更迅速,封堵效果优于高注入流量(7.5、10 mL/min)。随着注浆循环的进行,生成的沉淀对裂隙中存在的渗流通道逐个封堵<sup>[16]</sup>,裂隙渗透性快速下降,同时,注浆压力明显增加(图4)。在该阶段(注浆中后期),如图4所示,在注入流量为2.5 mL/min工况下,裂隙导水系数快速下降出现的循环次数明显滞后于较高流量条件(7.5、10 mL/min)。在不同注入流量条件下,5 mL/min工况在整个注浆循环过程中表现出良好的封堵效果。

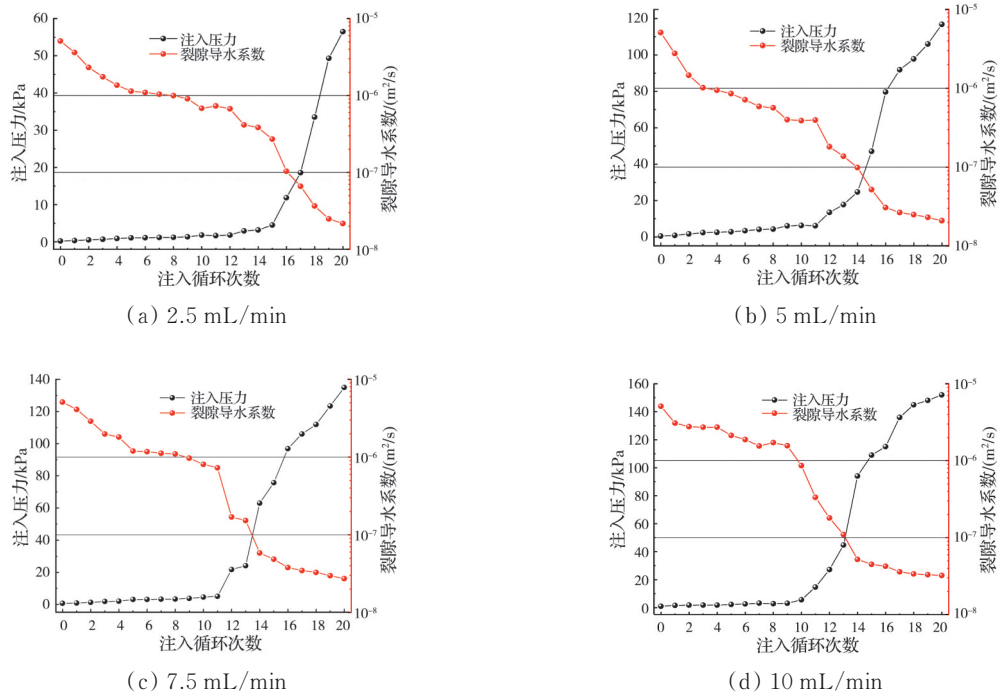


图 4 注入流量对裂隙封堵过程中注浆压力及裂隙渗透性的影响

Fig. 4 Effect of grouting flow rate on grouting pressure and seepage reduction during fracture sealing

2.3 注入流量对裂隙中沉淀分布特征的影响

图 5(a2、b2、c2、d2)为不同注入流量试验中沉淀分布厚度云图。从图中可直观地观察沉淀在裂隙中的分布特征。为进一步量化分析,沿浆液流动

方向(自注入口至出口),每 10 mm 为一个区间,将沉淀分布厚度数据划分为 30 个区段,通过提取各区段内沉淀厚度数据计算出沉淀分布厚度的平均值(图 5(a1、b1、c1、d1)),可以看到,微生物浆液注入流

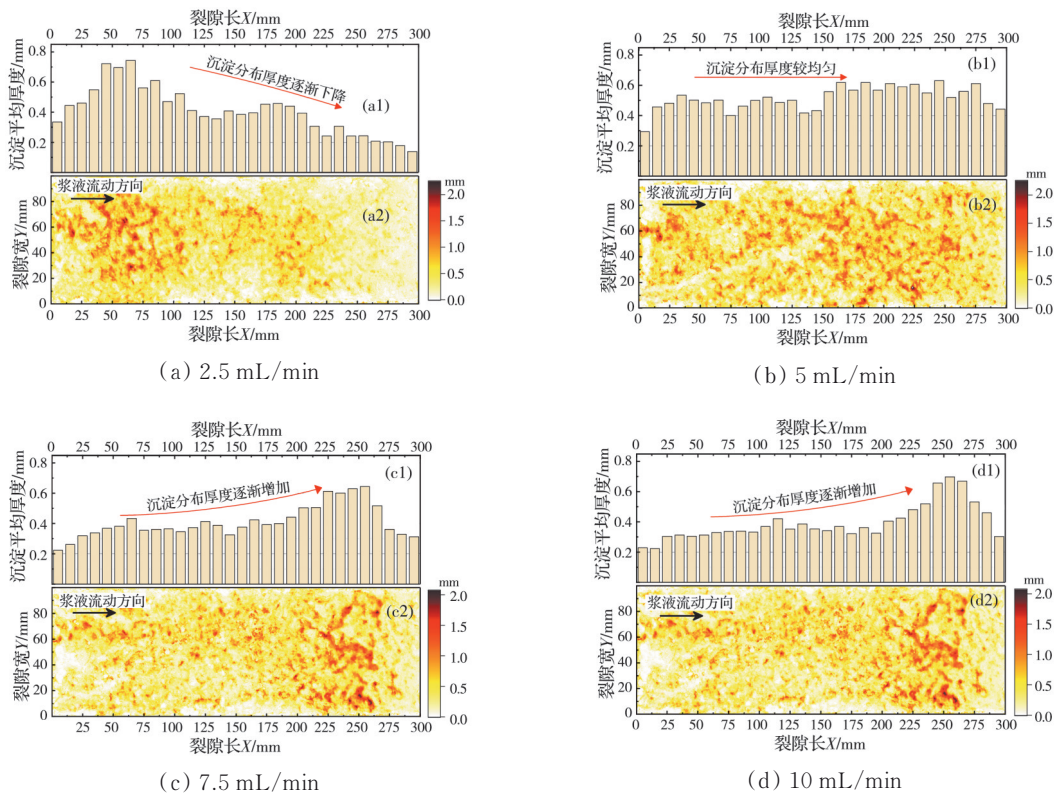


图 5 不同注入流量裂隙沉淀分布云图及每 10 mm 区间沉淀平均厚度

Fig. 5 Cloud map of precipitate distribution and average precipitate thickness per 10-mm interval in fractures under different grouting flow rates

量对裂隙中沉淀分布具有显著影响。当注入流量为2.5 mL/min时,可以看到,沉淀在裂隙注入入口附近分布厚度明显较大。在距注入入口45~65 mm范围内沉淀堆积最多,最厚达0.74 mm。而在65 mm至裂隙出口范围内,沉淀分布厚度基本持续降低(图5(a1))。表明在注入流量为2.5 mL/min的条件下沉淀主要集中于注入入口区域,未能有效覆盖整个裂隙,对裂隙的封堵效果较差。

当注入流量为5 mL/min时,沉淀分布明显变均匀(图5(b1)),整个裂隙中沉淀厚度基本维持在0.4~0.6 mm之间,分布均匀且连续(图5(b2))。当流量进一步增加至7.5、10 mL/min时,沉淀分布呈不均匀的趋势,在浆液流动出口富集。并且由图5(c1)、(d1)可知,在距注入入口225~265 mm范围内,沉淀分布厚度明显增加,最高达0.7 mm。此外,在距注入入口0~235 mm范围内,7.5 mL/min工况下沉淀厚度普遍高于10 mL/min工况;而在距注入入口235 mm到出口范围内,10 mL/min工况下的沉淀厚度明显更大。可见,随着注入流量的增大,沉淀进一步集中分布在裂隙出口位置。

### 3 分析与讨论

当注入流量为2.5、5 mL/min时,裂隙注入入口沉淀分布较厚,在初始循环中裂隙导水系数下降明显,尤其在2.5 mL/min工况下,在距注入入口45~65 mm范围内,沉淀平均厚度达到最大(0.74 mm),对裂隙注入入口造成严重封堵。该堵塞导致注浆初期渗透性快速降低,既使得菌液在裂隙中运输受限,又由于较大的注浆压力而不能对裂隙中存在的渗流通道进行封堵<sup>[35]</sup>。因此,随着注浆循环的进行,裂隙渗透性下降减缓,且裂隙中沉淀分布厚度沿注入方向逐渐降低(图5(a))。当注入流量增大到7.5、10 mL/min时,较大的流动剪切力导致裂隙中附着的菌液明显减少,同时使得沉淀主要分布在裂隙出口附近。尽管附着的沉淀使得裂隙渗透性快速下降,但与此同时,增大的注入压力(图4(c)、(d))使得裂隙中浆液流速明显增加<sup>[16]</sup>,导致菌液及反应生成的沉淀难以在裂隙中附着,堆积在裂隙出口,形成沉淀封堵过滤区<sup>[16,27]</sup>,因此,在注浆循环结束后,沉淀也未能对裂隙进行大范围有效填充。相比之下,尽管在5 mL/min注入流量下菌液滞留率相较于2.5 mL/min时发生了明显下降(图3),但在矿化封堵过程中沉淀分布均匀(图5),同时对裂隙产生

了高效的封堵效率(图4)。由此可知,在5 mL/min注入条件下,菌液在裂隙中达到较为理想的附着状态,并促使沉淀均匀分布,可见,在该流速下维持较高菌液运移效率的同时,实现了沉淀在裂隙空间的均匀分布与有效封堵。

在微生物矿化封堵裂隙中,常用流速来反映注入流量的变化<sup>[25]</sup>。了解裂隙中浆液流速大小对沉淀分布的影响可为该技术工程化应用提供合理的注浆设计参数。表1为试验中不同注入流量条件下微生物浆液矿化封堵前裂隙中初始流速平均值。由表1可见,在注入流量为5 mL/min时,浆液在裂隙中的平均流速为4.708 mm/s。对于封堵裂隙中较高流速导致的持续开放渗流通道,El Mountassir等<sup>[26]</sup>通过将注入流量降低至0.6 mL/min实现了对裂隙良好的封堵效果,计算得到该条件下对应的裂隙中浆液流速为4 mm/s。这一结果与本研究的流速范围较为接近,进一步表明将浆液流速控制在4~5 mm/s范围内可实现对裂隙高效、稳定的微生物矿化封堵。

表1 不同注入流量下裂隙中的浆液流速平均值

Table 1 Average grout flow velocity in fractures under different grouting flow rates

注入流量/(mL/min)	流速平均值/(mm/s)
2.5	2.354
5.0	4.708
7.5	7.062
10.0	9.416

此外,注浆流量对裂隙中沉淀效率的影响也受到众多学者关注。Wu等<sup>[27]</sup>和Shi等<sup>[25]</sup>统计了相关学者<sup>[25-27]</sup>的试验数据并通过拟合得到沉淀效率与浆液流速的关系曲线,发现沉淀效率随着浆液流速的增大呈指数型下降。在本研究中,控制沉淀较均匀分布的条件下(注入流量为5 mL/min),即裂隙中浆液流速为4.708 mm/s时,根据学者的拟合曲线,通过对比可以看出,此时沉淀效率较高,沉淀性能良好。

在微生物矿化封堵裂隙中,控制浆液流速在4~5 mm/s范围内能为微生物浆液提供适宜的沉淀环境,此时不仅浆液利用效率较高,还能促进沉淀均匀分布,从而显著提升对裂隙的封堵效果。

### 4 结论

利用自主设计的裂隙模型试验装置,开展不同微生物浆液注入流量对岩体裂隙封堵降渗效果及

沉淀分布特征的影响试验,获得注浆流量对菌液滞留效应的影响以及矿化封堵过程中裂隙渗透性的演化规律,并借助三维激光扫描量化裂隙中沉淀分布厚度,得出如下结论:

1)当注入流量从2.5 mL/min增大到10 mL/min时,增大的流动剪切力显著降低了微生物的滞留效率,裂隙中浆液附着率从35.5%降至0.29%。

2)在不同注入流量条件下,经历20次注浆循环后,各试验组裂隙渗透性均出现相近程度的下降,但降渗过程差别较大。通过对注浆后裂隙中沉淀分布扫描观察发现,2.5 mL/min注入条件下沉淀主要分布在注入口,导致初始循环中裂隙渗透性快速下降。在7.5、10 mL/min注入条件下,增大的流动剪切力使得沉淀主要分布在浆液流出口,因此,在初始注浆循环中裂隙渗透性下降速度较缓,但在注浆中后期下降明显。相比之下,在矿化封堵过程中,5 mL/min注入流量时沉淀分布均匀,对裂隙封堵效率较高。

3)综合浆液流速对微生物滞留率、裂隙矿化封堵效率及沉淀分布均匀性等关键指标的影响,基于0.177 mm隙宽的人工裂隙模型发现,当浆液流速为4.708 mm/s时,可在裂隙中形成最优封堵环境。然而,实际工程中裂隙尺寸和形态多样,今后有必要开展多裂隙尺寸(如0.1~1.0 mm)与复杂形态(如曲折裂隙、交叉裂隙等)条件下的系统试验,以确定不同裂隙特征对应的合理注浆速率范围,从而为工程应用提供可靠的设计依据。

## 参考文献

- [1] Chen Y F, Zeng J, Shi H T, et al. Variation in hydraulic conductivity of fractured rocks at a dam foundation during operation[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(2): 351-367.
- [2] 王誉泽, 鲁黎. MICP技术用于地质碳封存的微观机理研究初探[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(增刊2): 134-138. Wang Y Z, Lu Y. Preliminary study on microscopic mechanism of MICP technology used in geological carbon storage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(Sup 2): 134-138.
- [3] 刘慧, 朱闽楷, 金龙, 等. 基于MICP的寒区隧道围岩降渗加固试验研究[J]. *冰川冻土*, 2025, 47(4): 963-976. Liu H, Zhu M K, Jin L, et al. Experimental study on seepage reduction and reinforcement of tunnel surrounding rock in cold regions based on MICP[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2025, 47(4): 963-976. (in Chinese)
- [4] 刘乾灵, 张彬, 李玉涛, 等. MICP技术在地下水封油库渗控注浆中的应用潜力[J]. *工程地质学报*, 2024, 32(4): 1412-1423. Liu Q L, Zhang B, Li Y T, et al. Application potential of MICP in seepage control grouting of underground water-sealed oil storage cavern[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(4): 1412-1423. (in Chinese)
- [5] Bagal J, Onadoko G, Hazel P, et al. Annular barrier as an alternative to squeezes in challenging wells: technology review and case histories[C]//SPE/AAPG Africa Energy and Technology Conference. December 5-7, 2016. City Nairobi, Kenya. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2016: SPE AFRC-2583084-MS.
- [6] Weideborg M, Källqvist T, Odegård K E, et al. Environmental risk assessment of acrylamide and methacrylamide from a grouting agent used in the tunnel construction of Romeriksporten, Norway[J]. *Water Research*, 2001, 35(11): 2645-2652.
- [7] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(1): 1-14. Liu H L, Xiao P, Xiao Y, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 1-14. (in Chinese)
- [8] 程晓辉, 麻强, 杨钻, 等. 微生物灌浆加固液化砂土地基的动力反应研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(8): 1486-1495. Cheng X H, Ma Q, Yang Z, et al. Dynamic response of liquefiable sand foundation improved by bio-grouting[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(8): 1486-1495. (in Chinese)
- [9] 钱春香, 王安辉, 王欣. 微生物灌浆加固土体研究进展[J]. *岩土力学*, 2015, 36(6): 1537-1548. Qian C X, Wang A H, Wang X. Advances of soil improvement with bio-grouting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1537-1548. (in Chinese)
- [10] Minto J M, Maclachlan E, El Mountassir G, et al. Rock fracture grouting with microbially induced carbonate precipitation[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(11): 8827-8844.
- [11] 刘阿强, 谢浏洋, 肖杨, 等. 生物激发加固土的剪切特性大型直剪试验研究[J/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2025-03-31. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20250331.0922.002>. Liu A Q, Xie L Y, Xiao Y, et al. Large-scale direct shear test study on shear characteristics for MICP-treated soil using biostimulation approach[J/OL]. *Journal of*

- Civil and Environmental Engineering, 2025-03-31. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20250331.0922.002>. (in Chinese)
- [12] 肖维民, 林馨, 钟建敏, 等. 岩石节理微生物诱导碳酸钙沉积封堵渗流演化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(10): 2798-2808.
- Xiao W M, Lin X, Zhong J M, et al. Experimental study on rock joint permeability evolution during plugging process by microbially induced calcite precipitation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(10): 2798-2808. (in Chinese)
- [13] Tobler D J, Minto J M, El Mountassir G, et al. Microscale analysis of fractured rock sealed with microbially induced CaCO<sub>3</sub> precipitation: influence on hydraulic and mechanical performance[J]. Water Resources Research, 2018, 54(10): 8295-8308.
- [14] Wu C Z, Chu J, Wu S F, et al. Quantifying the permeability reduction of biogROUTED rock fracture[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(3): 947-954.
- [15] Guo L, Peng Y Q, Wang B Q, et al. Experimental study on the evolution of flow channels and precipitation characteristics in microbially induced fracture biomineralization[J]. International Journal of Geomechanics, 2025, 25(10): 04025224.
- [16] Liu Q L, Zhang B, Wang J K, et al. Microbially mediated rock fine fracture mineralization sealing: evolution of flow channels and the resulting transmissivity reduction [J]. Engineering Geology, 2024, 334: 107525.
- [17] 徐溪晨, 郭红仙, 程晓辉, 等. 钙源对微生物矿化胶结砂土材料均匀性的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(5): 57-63.
- Xu X C, Guo H X, Cheng X H, et al. Effect of calcium sources on uniformity of bio-cemented sand materials[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(5): 57-63. (in Chinese)
- [18] Cuthbert M O, Riley M S, Handley-Sidhu S, et al. Controls on the rate of ureolysis and the morphology of carbonate precipitated by *S. Pasteurii* biofilms and limits due to bacterial encapsulation[J]. Ecological Engineering, 2012, 41: 32-40.
- [19] Tobler D J, Maclachlan E, Phoenix V R. Microbially mediated plugging of porous media and the impact of differing injection strategies[J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 270-278.
- [20] Chen Y Q, Wang S Q, Tong X Y, et al. Towards the sustainable fine control of microbially induced calcium carbonate precipitation[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 377: 134395.
- [21] Minto J M, Lunn R J, El Mountassir G. Development of a reactive transport model for field-scale simulation of microbially induced carbonate precipitation[J]. Water Resources Research, 2019, 55(8): 7229-7245.
- [22] Zambare N, Lauchnor E G, Gerlach R. Controlling the distribution of microbially precipitated calcium carbonate in radial flow environments[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(10): 5916-5925.
- [23] Guo L, Zhang M, Liao M W, et al. Investigation of additive-assisted microbial-induced calcium carbonate precipitation in 3D printed cross fractures[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2023, 34: 100450.
- [24] Peng S Q, Di H, Fan L, et al. Factors affecting permeability reduction of MICP for fractured rock[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 217.
- [25] Shi L, Yang X, Li J X, et al. Investigation on the influence factor for the permeability reduction effect in biogROUTED fracture using stage injection strategy[J]. Engineering Geology, 2025, 345: 107869.
- [26] El Mountassir G, Lunn R J, Moir H, et al. Hydrodynamic coupling in microbially mediated fracture mineralization: formation of self-organized groundwater flow channels[J]. Water Resources Research, 2014, 50(1): 1-16.
- [27] Wu C Z, Chu J, Wu S F, et al. 3D characterization of microbially induced carbonate precipitation in rock fracture and the resulted permeability reduction[J]. Engineering Geology, 2019, 249: 23-30.
- [28] Whiffin V S, van Paassen L A, Harkes M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique [J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(5): 417-423.
- [29] 周宏伟, 谢和平, Kwasniewski M A. 粗糙表面分维计算的立方体覆盖法[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(6): 455-459.
- Zhou H W, Xie H P, Kwasniewski M A. Fractal dimension of rough surface estimated by the cubic covering method[J]. Tribology, 2000, 20(6): 455-459. (in Chinese)
- [30] Tobler D J, Cuthbert M O, Phoenix V R. Transport of *Sporosarcina pasteurii* in sandstone and its significance for subsurface engineering technologies[J]. Applied Geochemistry, 2014, 42: 38-44.
- [31] Harkes M P, van Paassen L A, Booster J L, et al. Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 112-117.
- [32] 张珂嘉. 裂隙岩体微生物诱导碳酸钙沉淀行为规律及其阻渗机制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.

- Zhang K J. Study on the behavior and permeability inhibition mechanism of microbial induced calcite precipitation in fractured rock mass[D]. Changsha: Central South University, 2023. (in Chinese)
- [33] 张靖. 基于克里金算法的点云数据插值研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- Zhang J. Interpolation of point clouds data based on Kriging interpolation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [34] Ramachandran S K, Ramakrishnan V, Bang S S. Remediation of concrete using micro-organisms[J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(1): 3-9.
- [35] Kirkland C M, Akyel A, Hiebert R, et al. Ureolysis-induced calcium carbonate precipitation (UICP) in the presence of CO<sub>2</sub>-affected brine: a field demonstration[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 109: 103391.

(编辑 王秀玲)